

**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ  
И НАГРЕВА СЛЯБИНГОВЫХ СЛИТКОВ**

*Выполнен анализ известных технологических процессов формирования и нагрева слябинговых слитков. Разработаны математические модели и на их базе создана система автоматизированного управления предпрокатной подготовкой слитков.*

Снижение расхода энергетических и материальных ресурсов при производстве металлургической продукции, непосредственно отражающихся в ее себестоимости, является одной из главных технико-экономических задач.

Основным недостатком существующей технологии подготовки к прокату стальных слябинговых слитков на металлургических предприятиях Украины, и стран СНГ является высокий расход природного газа. Поэтому до сих пор ведутся исследования и разработка энергосберегающих технологий предпрокатной подготовки слитков. [1 – 3]. В таких технологических процессах, с целью экономии энергоресурсов используется тепло, содержащееся в металле после разливки в изложницу, и совершенствуется процесс нагрева слитков. Использование тепла слитков с жидкой сердцевинной и эффективных режимов нагрева позволяет экономить газообразное топливо и получать значительный экономический эффект в масштабах массового производства. Например, снижение расхода газа при нагреве слитков в ячейках нагревательных колодцев на 1 м<sup>3</sup>/т в объеме производства только металлургического комбината им. Ильича оценивается несколькими сотнями тысяч гривен за год. Как показано в [1–3] энергосберегающие технологии предпрокатной подготовки слитков позволяют также значительно снизить угар металла, количество оплавлений поверхности слитков, количество поверхностных дефектов, износ валков клетей прокатных станов, повысить межремонтный срок эксплуатации колодцев и выход годного металла. Только экспериментальные методы совершенствования технологии на действующем производстве требуют длительных по времени дорогостоящих исследований, сопровождающихся дополнительными расходами энергоресурсов, возможным выходом брака, и усложнением режима работы сталеплавильных и прокатных цехов. Поэтому при разработке новых технологий применяют математическое моделирование технологических процессов. Однако математические модели, которые применялись при разработке технологий, описанных в [1–3] имеют локальный характер и моделируют только часть процессов из всего технологического цикла предпрокатной подготовки слитков. При разработке технологии описанной в [1], применялась упрощенная модель нагрева слитков, имеющая невысокую точность. Разработанная модель реализована в виде таблиц улучшенного режима нагрева. При разработке технологии, описанной в [2–3], также использовались локальные модели затвердевания и нагрева слитков, в которых граничные условия на поверхности слитков определялись экспериментально для заранее определенных режимов нагрева. Граничные условия на поверхности слитков зависят от температуры, количественного и качественного состава продуктов сгорания в нагревательной ячейке и определяются режимом нагрева слитков. Применение моделей, описанных в [1–3] к экспериментально неисследованным режимам нагрева не может быть обосновано. Такие технологии не адаптированы к изменению многих значимых параметров, влияющих на технологический процесс. Например, они не учитывают изменения температуры в разливочном ковше, начальную температуру изложниц, скорость разливки, начальное температурное поле кладки ячейки, изменение количества и состава продуктов сгорания в нагревательной ячейке. Но главное, что в этих технологиях математические модели не используются для управления всем технологическим процессом в реальном режиме времени. Они позволяют получать результаты, лучшие по отношению к предыдущим базовым технологиям, но не определяют оптимальные результаты.

Целью данной работы является создание автоматизированной системы, позволяющей разрабатывать оптимальные режимы формирования и нагрева слябинговых слитков.

Для разработки оптимальной технологии были созданы математические модели, охватывающие весь технологический цикл от разливки металла до выдачи слитка в прокат. При этом

<sup>1</sup> ПГТУ, ст. препод.

<sup>2</sup> ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

удалось создать математическую модель процессов теплообмена при разливке металла в изложницу и модель нагрева слитков, в которой сопрягается расчет лучистого и конвективного теплообмена в газовой среде внутри нагревательной ячейки с расчетом теплообмена внутри садки слитков. На базе этой математической модели была разработана автоматизированная система управления предпрокатной подготовкой слябинговых слитков. Особенностью этой системы является максимальная степень использования имеющегося оборудования, технических и измерительных средств. С помощью автоматизированной системы решаются следующие задачи:

1. Определяются тепловые параметры слитков доставляемых в отделения нагревательных колодцев цехов слябингов, например, температура поверхности, среднемассовая температура, градиенты температур и энтальпия слитков во время их посадки в ячейку и ряд других их тепловых параметров.
2. Определяется температура нагрева ячейки перед посадкой слитков, чтобы наиболее рационально использовать внутреннее теплосодержание слитков.
3. Определяются временные и температурные режимы выдержки слитков в ячейке без дополнительного нагрева газом.
4. Вырабатывается закон управления нагревом слитков в ячейке, при котором будет минимизирован расход природного газа.
5. Определяются тепловые параметры слитков выдаваемых в прокат на слябинг.

Автоматизированная система управления настраивается на марку стали, температуру жидкого металла в разливочном ковше, начальную температуру изложницы, размеры слитка и изложницы, время налива металла в изложницы, время раздевания и транспортировки слитков в отделения нагревательных колодцев, начальное температурное поле кладки нагревательной ячейки.

В основу создания такой автоматизированной системы положены математические модели процессов формирования и нагрева слитков. Эти модели имитируют процессы теплообмена и кристаллизации слитков на основе решения дифференциальных уравнений энергии и движения для систем:

1. Разливочный ковш – выливаемая из ковша струя жидкого металла – изложница с жидким металлом, изменяющегося уровня – окружающая среда, вместе с заданными краевыми и начальными условиями.
2. Слиток – окружающая среда, с заданными краевыми и начальными условиями на момент стрипперования слитка.
3. Факел газовой горелки – внутренняя среда ячейки нагревательного колодца без слитков – теплоизолирующая кладка ячейки – окружающая среда, вместе с начальными и краевыми условиями.
4. До восьми слитков – смесь внутренней среды ячейки с частью окружающей среды, проникшей при посадке слитков – теплоизолирующая кладка ячейки без крышки – окружающая среда, вместе с начальными и краевыми условиями.
5. Факел газовой горелки – внутренняя среда ячейки, заполненная продуктами сгорания газа – до восьми слитков – теплоизолирующая кладка ячейки – окружающая среда, вместе с начальными и краевыми условиями.
6. Слитки – смесь внутренней среды ячейки с частью окружающей среды, проникшей при выдаче слитков – теплоизолирующая кладка ячейки без крышки – окружающая среда, вместе с начальными и краевыми условиями.

Для того чтобы автоматизированная система управления предпрокатной подготовкой слябинговых слитков могла работать в режиме реального времени, необходимо моделировать процессы теплообмена в системах 1 – 6 в режиме многократного ускорения времени. В этом случае на начальном этапе процесса формирования слитков производится несколько расчетов нагрева слитков и выбирается наилучший вариант для реализации. Время от окончания разливки до начала посадки слитков в нагревательные ячейки составляет 1,25 – 1,3 часа и ограничивает время расчетов и принятия решений. Как показали исследования, известные явные численные методы интегрирования дифференциальных уравнений энергии и движения для систем 1 – 6, описанные в [4,5], не позволили моделировать процессы формирования и нагрева слитков с требуемой точностью за промежутки времени меньшие по сравнению с длительностью реальных процессов и оказались непригодными для решения поставленных выше задач. Например, цикл

формирования и нагрева слитков длительностью пять часов с момента разливки до момента выдачи моделируется шесть часов. Объясняется это сложностью систем 1 – 6, большими габаритами и массой элементов, входящих в эти системы. Например, вес посада из восьми слитков в нагревательную ячейку составляет 160 т. Поэтому для того чтобы получить достаточную точность расчетов, слитки и кладку ячейки даже с учетом симметрии необходимо разбивать не менее чем на 120000 элементов.

В неявных методах шаг интегрирования по времени не связан с шагами интегрирования по пространственным координатам условием устойчивости. Это позволяет при прочих равных условиях увеличить шаг интегрирования и скорость расчетов в неявных методах по сравнению с явными методами. При разработке автоматизированной системы были исследованы различные неявные численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, в том числе неявные методы дробных шагов подробно описанные в [4, 5]. Одними из самых эффективных методов, оказался метод дробных шагов, в котором исходные трехмерные дифференциальные уравнения в частных производных расщепляются на одномерные уравнения. Затем на одном и том же временном шаге последовательно по каждой пространственной координате осуществляют интегрирование соответствующих одномерных уравнений.

Обозначим процедуру интегрирования одномерного дифференциального уравнения по координате  $p$  -  $\Lambda_p$ . После этого известные схемы дробных шагов, при исследовании которых были получены наилучшие результаты, формально описываются в виде:

$$\Lambda_x \rightarrow \Lambda_y \rightarrow \Lambda_z \rightarrow \dots \quad (1)$$

$$0.5\Lambda_x \rightarrow 0.5\Lambda_y \rightarrow 0.5\Lambda_z \rightarrow 0.5\Lambda_z \rightarrow 0.5\Lambda_y \rightarrow 0.5\Lambda_x \rightarrow \dots \quad (2)$$

Однако применение самой эффективной известной схемы 2 позволило производить расчёт и анализ двух – трёх вариантов нагрева слитков за время от окончания разливки до начала посадки, что недостаточно для определения оптимального процесса нагрева. Поэтому для увеличения точности и скорости счета, была разработана и реализована схема:

$$(\Lambda_x \rightarrow \Lambda_y \rightarrow \Lambda_z) \rightarrow (\Lambda_y \rightarrow \Lambda_z \rightarrow \Lambda_x) \rightarrow (\Lambda_z \rightarrow \Lambda_x \rightarrow \Lambda_y) \rightarrow \dots \quad (3)$$

Трудоёмкость и скорость счета схемы (3) такая же, как и схемы (1) при одинаковых временных шагах интегрирования. Как показали сравнительные расчеты схема (3) на первых временных шагах дает такую же погрешность что и схема (1), а на последующих временных шагах она достигает такой же точности, как и схема (2). Это можно объяснить тем, что при числе временных шагов больше трёх в схеме (3) проявляется эффект перемешивания очередности интегрирования по пространственным координатам на каждом последующем временном шаге интегрирования. Схема (3) позволила производить расчет и анализ до 6-7 вариантов нагрева слитков и определять режим нагрева близкий к оптимальному режиму. На диаграмме рис.1 отображены характеристики различных неявных численных методов решения (вычисления производились на компьютере Pentium – 4 с тактовой частотой 2500 МГц) дифференциальных уравнений энергии и движения для систем 1-6 при равных погрешностях.

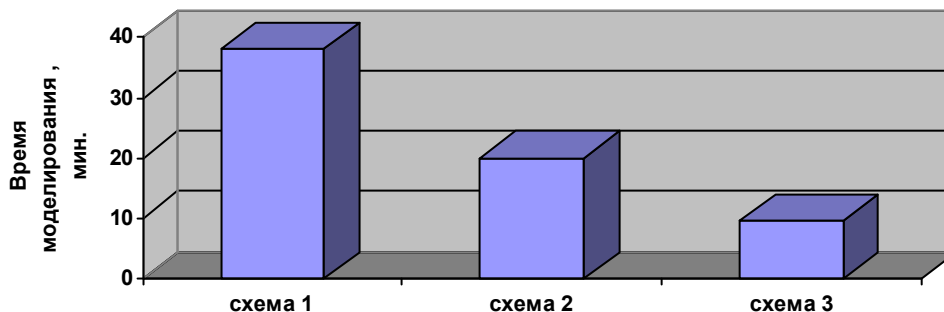


Рис.1 – Характеристики различных неявных численных методов

Погрешность моделирования систем 1-6 оценивали следующим образом. В результате пробных расчётов определялись шаги интегрирования по пространственным координатам и по

времени, дальнейшее уменьшение которых не приводило к изменению результатов расчётов более чем на 3%. Затем результаты расчётов сравнивались с результатами экспериментальных измерений температурных полей внутри затвердевающих слитков [6], температурами, измеряемыми на поверхностях изложниц и нагревательных ячеек, а также температурами, измеряемыми пирометрами внутри нагревательных ячеек. На рис. 2 изображены графики изменения температур в двадцатитонном слитке из стали 08 КП, затвердевающем в изложнице ( для условий производства на металлургическом комбинате им. Ильича). Кривые 1 и 2 показывают изменение температуры в центре слитка, а кривые 3 и 4 в центре большей грани. Кривые 1 и 3 получены экспериментально, а кривые 2 и 4 путём численного моделирования. Экспериментальные данные изменения температуры в других точках сечения слитка также использовались для оценки точности модели затвердевания слитка. Расхождение между экспериментальными и расчетными данными не превышало 5% по всему объёму слитка.

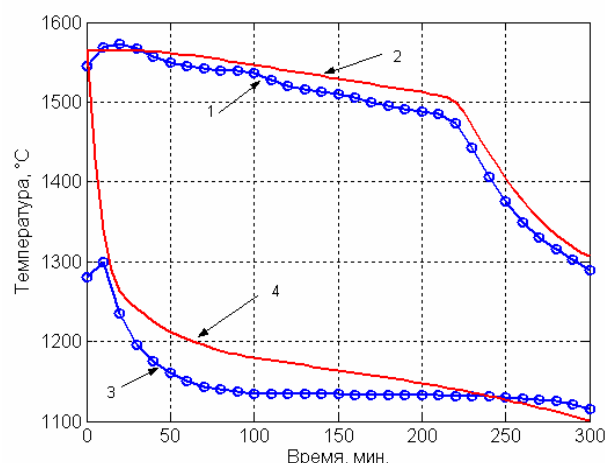


Рис.2 – Зависимость температуры слитка от времени

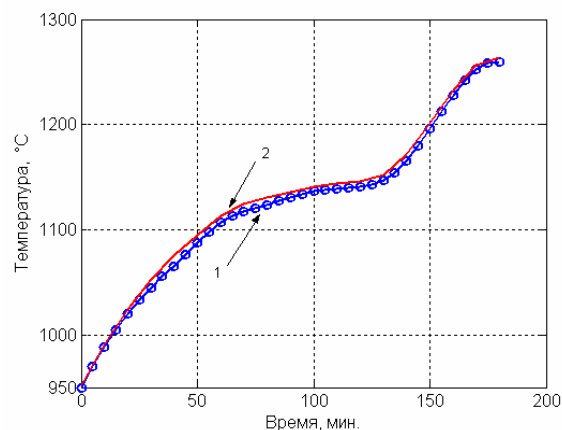


Рис. 3 – Зависимость температуры в ячейке от времени

На рис. 3 показано изменение температуры в нагревательной ячейке при нагреве слитков. Кривая 1 построена по результатам измерения температуры пирометром для одного из типичных процессов нагрева. Кривая 2 получена для этого же процесса в результате расчёта.

В настоящее время разрабатывается система для управления нагревом слитков в методических и кольцевых печах в основу которой положены описанные выше модели.

#### Выводы

1. Разработанные математические модели, более универсальны по сравнению с известными моделями и позволяют рассчитывать любые ранее не исследованные режимы нагрева.
2. Разработан новый метод, скорость счета которого в два раза выше скорости традиционных методов.
3. Предложенная и внедренная на металлургическом комбинате им. Ильича автоматизированная система управления предпрокатной подготовкой слябинговых слитков, позволяет экономить природный газ в объёме 2,3 м<sup>3</sup> / т. садки.

#### Перечень ссылок.

1. Омель Н.М. Совершенствование технологии нагрева слитков в нагревательных колодцах / Н.М. Омель, С.С. Тильга // *Сталь*. – 1998. – № 4. – С.42-44.
2. Барбаев В.И. Преимущества нагрева и прокатки слитков с повышенным теплосодержанием / В.И. Барбаев, М.Ф. Витушенко // *Сталь*. – 2000. – №6. – С.42-45.
3. Мирко В.А. Оптимизация работы отделения нагревательных колодцев при нагреве слитков с высоким теплосодержанием / В.А. Мирко, В.И. Барбаев // *Сталь*. – 1997. – №7. – С.33-36.
4. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
5. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Д. Андерсон, Дж. Таннехил, Р.Плетчер. – М.: Мир, 1990. – 384с.
6. Казанцев Е.И. Волюмотермограммы затвердевающего стального слитка. / Е.И. Казанцев, Е.А. Царицын // *Вестник Приазов. гос.техн. ун-та: Сб. науч. тр.* – Мариуполь, 1999. – Вып.7-А. – С.17-20.

Статья поступила 12.03.2004